CC BY

http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-5-69-75

УДК 621.382

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА АМПЛИТУДЫ ШУМОВЫХ ИМПУЛЬСОВ

А. О. ЗЕНЕВИЧ, О. В. КОЧЕРГИНА, И. Л. ТЕРЕХ

Белорусская государственная академия связи (Минск, Республика Беларусь)

Аннотация. Исследована возможность использования шумовых диодов в качестве чувствительных элементов термоанемометров. Экспериментально установлена зависимость среднего значения амплитуды шумовых импульсов от температуры и скорости воздушного потока для моделей диодов ND102L и ND103L. Показано, что при постоянном напряжении смещения, соответствующем напряжению пробоя шумового диода при максимальной температуре из исследуемого диапазона, увеличение скорости охлаждающего воздушного потока приводит к линейному росту амплитуды шумовых импульсов. Определена чувствительность предлагаемого способа, составившая 156,9 мВ·с/м для диода ND102L и 105,9 мВ·с/м для ND103L. Выполнено сравнение амплитудного способа измерения скорости с частотным. Установлено, что предложенный амплитудный способ обеспечивает меньшую погрешность (4,5 % для ND102L и 2,1 % для ND103L), более высокое быстродействие и простоту аппаратной реализации, что делает его перспективным для применения в компактных измерительных устройствах реального времени.

Ключевые слова: шумовой диод, воздушный поток, скорость, амплитуда импульсов, перенапряжение, температура, тепловой анемометрический способ, датчик.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Зеневич, А. О. Способ определения скорости воздушного потока на основе анализа амплитуды шумовых импульсов / А. О. Зеневич, О. В. Кочергина, И. Л. Терех // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 5. С. 69–75. http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-5-69-75.

A METHOD FOR DETERMINING AIR FLOW VELOCITY BASED ON THE ANALYSIS OF THE AMPLITUDE OF NOISE PULSES

ANDREY ZENEVICH, OLGA KOCHERGINA, IRINA TEREKH

Belarusian State Academy of Communications (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The possibility of using noise diodes as sensing elements of hot-wire anemometers was investigated. The dependence of the average value of the noise pulse amplitude on the temperature and air flow velocity was experimentally established for the ND102L and ND103L diode models. It was shown that, at a constant bias voltage corresponding to the breakdown voltage of the noise diode at the maximum temperature in the studied range, an increase in the cooling air flow velocity leads to a linear increase in the noise pulse amplitude. The sensitivity of the proposed method was determined to be 156.9 mV·s/m for the ND102L diode and 105.9 mV·s/m for the ND103L diode. A comparison of the amplitude method of velocity measurement with the frequency method was performed. It was found that the proposed amplitude method provides a lower error (4.5 % for ND102L and 2.1 % for ND103L), higher speed and simplicity of hardware implementation, which makes it promising for use in compact real-time measuring devices.

Keywords: noise diode, air flow, speed, pulse amplitude, overvoltage, temperature, thermal anemometric method, sensor.

Conflict of interest. The authors declare that there is no conflict of interest.

For citation. Zenevich A., Kochergina O., Terekh I. (2026) A Method for Determining Air Flow Velocity Based on the Analysis of the Amplitude of Noise Pulses. *Doklady BGUIR*. 24 (5), 69–75. http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-5-69-75 (in Russian).

Введение

Современные задачи метеорологии, проектирования и функционирования систем вентиляции, мониторинга окружающей среды требуют наличия надежных методов измерения скорости воздушного потока. Прибор для ее измерения, принцип действия которого основан на явлении конвективного теплообмена, называется термоанемометром. Чем выше скорость воздушного потока, тем интенсивнее он охлаждает нагретый элемент. Однако в современных термоанемометрах в качестве чувствительного элемента используется тонкая платиновая или вольфрамовая нить, что приводит к хрупкости устройства [1–3]. В связи с этим актуальной задачей является поиск альтернативных материалов и конструктивных решений, обеспечивающих повышение механической прочности и эксплуатационной надежности чувствительного элемента без снижения его метрологических характеристик. Перспективные направления исследований – разработка сенсорных структур и применение композитных или полупроводниковых материалов, обладающих высокой чувствительностью к тепловым изменениям и устойчивостью к внешним воздействиям.

Шумовые диоды, генерирующие шумовые импульсы с амплитудой, существенно превышающей тепловой шум, представляют собой потенциально чувствительный элемент для сенсорики. Известно, что амплитуда шумового импульса таких приборов зависит от температуры среды [4–6]. Интенсивность теплообмена между средой и шумовым диодом, в свою очередь, напрямую определяется скоростью воздушного потока. Таким образом, возникает предположение о существовании зависимости между амплитудой шумовых импульсов диода и скоростью воздушного потока. Однако количественная оценка этой зависимости для создания датчиков скорости воздушного потока, шумовых термоанемометров ранее не проводилось. В связи с этим цель исследований авторов – установление зависимости между амплитудой шумовых импульсов диода и скоростью воздушного потока, а также проведение экспериментальной оценки принципиальной возможности использования шумовых диодов в задачах определения скорости воздушного потока на основе анализа амплитудного распределения генерируемых ими шумовых импульсов.

Экспериментальная установка и методика измерения

Для проведения исследования была разработана экспериментальная установка, структурная схема которой показана на рис. 1, где приняты следующие обозначения: РТ – регулятор температуры; АМ – анемометр; ИПВ – источник потока воздуха; ШД – шумовой диод; Усил. – усилитель; А – амперметр; В – вольтметр; ИПН – источник постоянного напряжения; Осц. – осциллограф; ИАР – измеритель амплитудного распределения; Т – термометр; $R_н$ – сопротивление нагрузки.

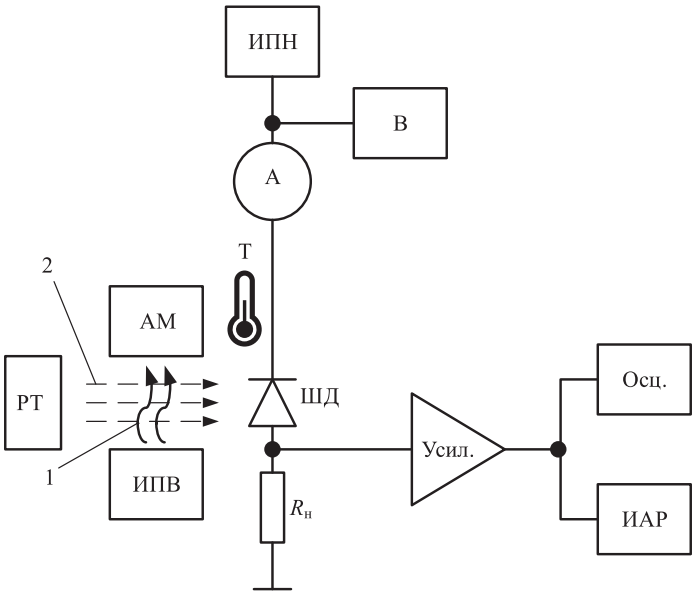


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки:
1, 2 – охлаждающий и нагревающий воздушные потоки соответственно
Fig. 1. Structural diagram of the experimental setup: 1, 2 – cooling and heating air flows, respectively

Регулятор температуры формирует нагревающий воздушный поток 2 с постоянной температурой 323 К и позволяет установить и поддерживать температуру ШД. Для охлаждения ШД после его нагрева до заданного значения температуры использовался охлаждающий воздушный поток 1, создаваемый ИПВ. Температура нагрева ШД в ходе эксперимента изменялась с помощью РТ в диапазоне от 293 до 323 К. Минимальное значение соответствовало условиям комнатной температуры. Верхний предел исследуемого температурного интервала был выбран с учетом предельно допустимых климатических норм умеренного географического пояса. Температура охлаждающего воздушного потока была постоянной и составляла 293 К. Температура охлаждающего и нагревающего воздушных потоков контролировалась с помощью встроенного термометра. Скорость воздушного потока от ИПВ регулировалась в пределах 0,05–2,60 м/с и контролировалась сертифицированным анемометром MS6250.

Напряжение обратного смещения $U_{см}$ на ШД подавалось от ИПН. Поскольку формирование шумовых импульсов в ШД происходило при значениях $U_{см}$, близких или превышающих напряжение пробоя $U_{пр}$ p–n-перехода [7], именно такие напряжения обратного смещения использовались в эксперименте. Значение сопротивления нагрузки $R_н$, при котором для всех величин $U_{см}$ удавалось сформировать шумовые импульсы, составляло 1 кОм. Поэтому в экспериментальной установке было использовано такое значение $R_н$. Помимо этого, $R_н$ = 1 кОм обеспечивало величины электрических токов для всех используемых напряжений обратного смещения меньше значения тока, при котором не происходил тепловой пробой ШД.

Шумовые импульсы, сформированные на сопротивлении нагрузки $R_н$, поступали на вход усилителя, где осуществлялось их усиление. Сформированные импульсы регистрировались осциллографом, что позволило оценить среднее значение амплитуды сформированных шумовых импульсов $<U_m>$. Параллельно с осциллографом для измерения амплитудного распределения импульсов использовался ИАР.

Величина $U_{см}$ измерялась при помощи вольтметра. Значение электрического тока, протекающего через ШД, определялось амперметром. Измерение и контроль силы тока были необходимы для определения напряжения пробоя ШД. При проведении измерений напряжение пробоя p–n-перехода ШД $U_{пр}$ устанавливалось по методике [8] на основании анализа вольт-амперной характеристики.

Объектами исследования выступали ШД производства ОАО «ЦВЕТОТРОН» (РБ) моделей ND102L, ND103L. Данные диоды достаточно хорошо зарекомендовали себя в системах для измерения и контроля температуры [8, 9]. Поскольку эти ШД имеют разные напряжения пробоя, для сравнения их некоторых характеристик между собой использовалось перенапряжение, определяемое как $\Delta U = U_{см} - U_{пр}$ [10].

Результаты исследования и их обсуждение

Согласно исследованиям [6], напряжение пробоя ШД увеличивается с повышением температуры. Зависимость $U_{пр}(T)$ можно представить как $U_{пр} = U_0 + kT$, где U_0 – напряжение пробоя p–n-перехода ШД при температуре 293 К; k – коэффициент линейной зависимости. Коэффициенты линейной зависимости k для исследуемых моделей ШД составляли 0,28 и 0,27 мВ/К для ND102L и ND103L соответственно.

На рис. 2 для диода ND102L представлены амплитудные распределения для шумовых импульсов при напряжении смещения $U_{см}$ = 9,30 В при разных температурах. Указанное значение напряжения смещения соответствует напряжению пробоя модели ND102L при 323 К. Для диода ND103L амплитудное распределение шумовых импульсов имело аналогичный вид. Повышение температуры приводило к тому, что амплитуда шумовых импульсов уменьшалась. Это связано с тем, что при повышении температуры растет напряжение пробоя ШД. При этом уменьшается величина ΔU, и, следовательно, – уменьшается амплитуда шумовых импульсов.

Результаты исследования зависимости среднего значения амплитуды шумовых импульсов от температуры при постоянном значении напряжения обратного смещения ШД представлены в табл. 1. Как видно из табл. 1, при повышении температуры от 293 до 323 К среднее значение амплитуды шумовых импульсов при постоянном $U_{см}$ для диода ND102L уменьшалось от 400 мВ, а для ND103L – от 270 мВ практически до нулевого уровня в пределах погрешности измерений. Величины напряжения смещения 9,30 В и 8,82 В соответствуют $U_{пр}$ исследуемых

моделей при 323 К. Зависимость среднего значения амплитуды шумовых импульсов от температуры $<U_m>(T)$ при постоянном значении $U_{см}$ для всех исследуемых ШД линейна. Если при изменении температуры в диапазоне ΔT среднее значение амплитуды шумовых импульсов $<U_m>$ изменялось на величину ΔU_m, то для зависимости $<U_m>(T)$ коэффициент линейности определялся по формуле $\delta = \Delta U_m/\Delta T$ (табл. 1).

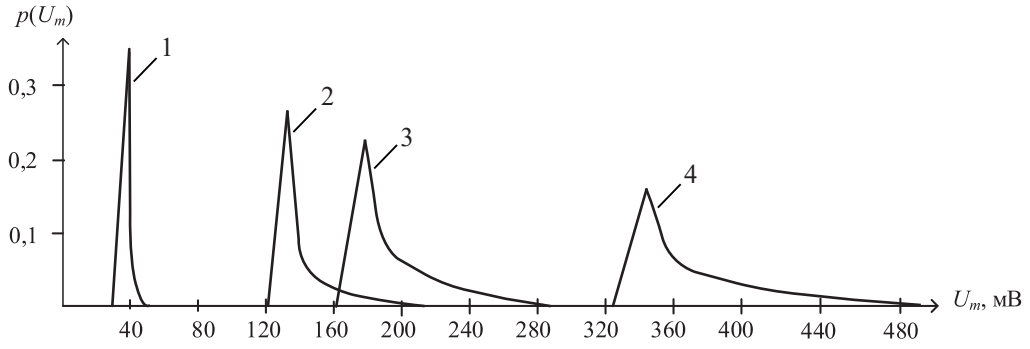


Рис. 2. Распределение амплитуды шумовых импульсов для модели ND102L при постоянном напряжении смещения при температурах, К: 1 – 323; 2 – 313; 3 – 303; 4 – 293
Fig. 2. Distribution of noise pulse amplitude for the ND102L model at constant bias voltage at temperatures, K: 1 – 323; 2 – 313; 3 – 303; 4 – 293

Таблица 1. Результаты исследования зависимости среднего значения амплитуды шумовых импульсов от температуры при постоянном значении $U_{см}$ шумовых диодов
Table 1. Results of the study of the dependence of the average value of the amplitude of noise pulses on temperature at a constant value of U_b of noise diodes

Модель шумового диода	Напряжение смещения $U_{см}$, В	Температура T, К	Среднее значение $<U_m>$, мВ	Коэффициент линейности δ, мВ/К
ND102L	9,30	293	400	–13,3
		303	260	
		313	140	
		323	0	
ND103L	8,82	293	270	–9,0
		303	180	
		313	95	
		323	0	

Большее значение δ наблюдалось для ШД ND102L по сравнению с ND103L. Это означает, что для ШД ND102L существует более сильная зависимость изменения амплитуды от изменения температуры, что обусловлено отличием внутренней структуры исследуемых моделей.

Для получения наибольшей зависимости среднего значения амплитуды шумовых импульсов исследуемых ШД от скорости воздушного потока следует выбирать напряжения смещения 9,30 В для ШД ND102L и 8,82 В для ND103L, поскольку при данных значениях $U_{см}$ обеспечивается уменьшение амплитуды импульсов ШД практически до нулевого уровня в пределах погрешности измерений в исследуемом диапазоне температур. Это, в свою очередь, обеспечивает наибольшую чувствительность ШД к изменению температуры и, следовательно, к скорости воздушного потока, поскольку, чем больше скорость воздушного потока, тем быстрее устанавливается температура ШД. При меньших величинах $U_{см}$ среднее значение амплитуды шумовых импульсов уменьшается практически до нуля при температуре ниже 323 К, а при больших напряжениях смещения составляет значения, отличные от нуля, что затрудняет схемную реализацию предлагаемого способа.

Зависимости среднего значения амплитуды шумовых импульсов $U_{mв}$ от скорости воздушного потока при напряжениях смещения 9,30 и 8,82 В для ШД ND102L и ND103L соответственно представлены на рис. 3. Из рисунка видно, что увеличение скорости воздушного потока приводит

к увеличению амплитуды шумовых импульсов таким образом, что при v = 2,6 м/с среднее значение шумовых импульсов восстанавливается до величины, указанной в табл. 1. А это свидетельствует о достижении предельного охлаждения ШД.

Представленная на рис. 3 зависимость линейна и характеризует чувствительность ШД к скорости изменения воздушного потока, которая определяется как $S = \Delta U_{m\text{в}}/\Delta v$, где $\Delta U_{m\text{в}}$ – изменение среднего значения амплитуды шумовых импульсов при изменении скорости воздушного потока Δv. Величина S составила 156,9 и 105,9 мВ·с/м для ND102L и ND103L соответственно.

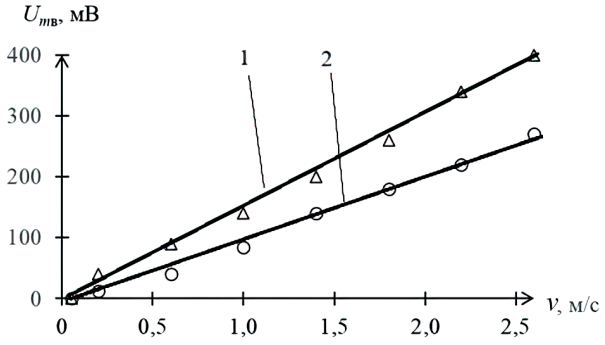


Рис. 3. Зависимость среднего значения амплитуды шумовых импульсов от скорости воздушного потока для модели: 1 – ND103L; 2 – ND102L

Fig. 3. Dependence of the average value of the amplitude of noise pulses on the air flow velocity for the model: 1 – ND103L; 2 – ND102L

Скорость охлаждающего воздушного потока 3,0 м/с позволяет охладить ШД до температуры 293 К за 30 с. Таким образом, на основании проведенных исследований можно предложить способ определения скорости воздушного потока на основе анализа амплитуды шумовых импульсов, для реализации которого необходимо установить напряжение смещения ШД, которое превышает напряжение пробоя. Последовательность осуществления предлагаемого способа:

– нагреть ШД до температуры, при которой амплитуда шумовых импульсов уменьшается на 90 % от первоначального значения;

– направить на ШД воздушный поток, скорость которого требуется определить;

– по величине изменения амплитуды шумовых импульсов на основании зависимости, представленной на рис. 3, определить величину скорости воздушного потока.

Для реализации способа определения скорости воздушного потока на основе анализа амплитуды шумовых импульсов лучше использовать ШД ND102L. Для ND102L характерны более высокая величина среднего значения амплитуды шумовых импульсов и большая зависимость $<U_m>$ от температуры. В [11] рассмотрен способ определения скорости воздушного потока по частоте следования шумовых импульсов. Сравнение обоих способов представлено в табл. 2, из которой видно, что погрешность измерения скорости воздушного потока способом на основе среднего значения амплитуды шумовых импульсов меньше, чем при измерении их частоты на 1,4 % для ШД ND102L и на 0,2 % – для ND103L.

Таблица 2. Сравнение способов определения скорости воздушного потока на основе шумовых диодов
Table 2. Comparison of air flow velocity detection methods based on noise diodes

Модель шумового диода	Погрешность на основе измерения, %	
	частоты шумовых импульсов	амплитуды шумовых импульсов
ND102L	5,9	4,5
ND103L	2,3	2,1

Согласно табл. 2, способ определения скорости воздушного потока по величине среднего значения амплитуды шумовых импульсов обладает существенными преимуществами с точки зрения быстродействия и аппаратной реализации. Измерение амплитуды является по своей природе локальным во времени и без необходимости накопления статистики. Это обеспечивает минимальную задержку получения результата, что особенно важно для систем реального времени, быстродействующих измерительных трактов и защитных устройств.

С аппаратной точки зрения амплитудное измерение требует сравнительно простой схемной реализации и может быть выполнено с использованием базовых аналоговых узлов, таких как компараторы, пиковые детекторы или аналого-цифровые преобразователи. В отличие от этого, определение частоты предполагает наличие стабильной опорной временной базы, счетчиков, таймеров и, как правило, цифровой обработки, что увеличивает сложность системы, ее энергопотребление. Таким образом, способ определения скорости воздушного потока по величине среднего значения амплитуды шумовых импульсов оказывается более эффективным в задачах, где критичны скорость реакции, компактность и минимальная вычислительная нагрузка.

Заключение

1. Экспериментально установлено, что увеличение скорости воздушного потока v приводит к увеличению среднего значения амплитуды шумовых импульсов $U_{m\text{в}}$ вследствие охлаждения p–n-перехода шумового диода. Полученная линейная зависимость $U_{m\text{в}}(v)$ позволяет использовать шумовые диоды в качестве чувствительных элементов для измерения скорости воздушного потока. Наибольшая чувствительность к изменению скорости потока наблюдалась у диода ND102L.

2. Выполнено сравнение способов определения скорости воздушного потока на основании частоты и среднего значения амплитуды шумовых импульсов. Сравнение показало, что способ определения скорости воздушного потока на основе измерения среднего значения амплитуды шумовых импульсов обладает меньшей погрешностью по сравнению со способом, основанным на измерении частоты шумовых импульсов. Кроме того, первый способ отличается более высоким быстродействием и меньшей аппаратной сложностью, что делает его перспективным для применения в системах реального времени и компактных измерительных устройствах.

3. В результате исследований установлено, что шумовой диод модели ND102L является более предпочтительным для реализации способа определения скорости воздушного потока по величине среднего значения амплитуды шумовых импульсов.

Список литературы

1. Еськин, А. А. Вентиляция. Ч. 1. Для студентов направления подготовки 08.03.01, 08.04.01 «Строительство» / А. А. Еськин, Н. С. Ткач, Н. Н. Турчанович. Владивосток: Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2022.
2. Corrsin, S. Extended Applications of the HotWire Anemometer / S. Corrsin // Review of Scientific Instruments. 1947. Vol. 18, No 7. P. 469–471.
3. Атмосфера. Методы определения скорости и расхода газопылевых потоков, отходящих от стационарных источников загрязнения: ГОСТ 17.2.4.06–90. Введ. 01.01.1991. М.: Изд-во стандартов, 1991.
4. Бельский, А. Я. Анализ шумовых характеристик диодного генератора в многоконтурной системе / А. Я. Бельский, С. М. Сацук, В. Н. Путилин // Доклады БГУИР. 2020. Т. 18, № 5. С. 9–16. https://doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-5-9-16.
5. Rota, F. Noise Source Diodes / F. Rota // VHF Communications. 2007. No 1. P. 11–19.
6. Рентюк, В. Высокоэффективный генератор шума на базе стабилизатора напряжения / В. Рентюк // Компоненты и технологии. 2014. № 1. С. 136–137.
7. Горбадей, О. Ю. Исследование характеристик потока импульсов шумовых диодов, работающих в режиме микроплазменного пробоя / О. Ю. Горбадей, А. О. Зеневич // Проблемы физики, математики и техники. 2018. № 2. С. 7–10.
8. On the Temperature Characteristics of Noise Diodes / A. O. Zenevich [et al.] // Semiconductors. 2024. Vol. 58, No 13. P. 80–83.
9. Zenevich, A. O. Noise Diode as a Basis for Creation of Temperature Alarm / A. O. Zenevich, O. V. Kochergina // Journal of Communications Technology and Electronics. 2025. Vol. 70, No 2. P. 57–60.
10. Гулаков, И. Р. Фотоприемники квантовых систем / И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич. Минск: Белор. гос. акад. связи, 2012.
11. Сигнализатор температуры: пат. BY № 24755 / А. О. Зеневич, О. В. Кочергина. Опубл. 30.10.2025.

Поступила 01.06.2026 Принята в печать 30.06.2026

References

1. Eskin A. A., Tkach N. S., Turchanovich N. N. (2022) *Ventilation. Part 1. For Students Majoring in Construction 08.03.01, 08.04.01*. Vladivostok, Far Eastern Federal University (in Russian).

2. Corrsin S. (1947) Extended Applications of the HotWire Anemometer. *Review of Scientific Instruments*. 18 (7), 469–471.
3. State Standard 17.2.4.06–90. *Atmosphere. Methods for Determining the Velocity and Flow Rate of Gas-Dust Flows Emanating from Stationary Pollution Sources*. Introduction 01.01.1991. Moscow, Publishing House of Standards (in Russian).
4. Belsky A. Ya., Satsuk S. M., Putilin V. N. (2020) Analysis of the Noise Characteristics of a Diode Generator in a Multi-Circuit System. *Doklady BGUIR*. 18 (5), 9–16. https://doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-5-9-16 (in Russian).
5. Rota F. (2007) Noise Source Diodes. *VHF Communications*. (1), 11–19.
6. Rentyuk V. (2014) Highly Efficient Noise Generator Based on a Voltage Stabilizer. *Components and Technologies*. (1), 136–137 (in Russian).
7. Gorbadey O. Y., Zenevich A. O. (2018) Investigation of the Characteristics of the Pulse Flux of Noise Diodes Operating in the Microplasma Breakdown Mode. *Problems of Physics, Mathematics and Technics*. (2), 7–10 (in Russian).
8. Zenevich A. O., Kochergina O. V., Buslyuk V. V., Fedosyuk D. N., Lushchy D. A. (2024) On the Temperature Characteristics of Noise Diodes. *Semiconductors*. 58 (13), 80–83.
9. Zenevich A. O., Kochergina O. V. (2025) Noise Diode as a Basis for Creation of Temperature Alarm. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 70 (2), 57–60.
10. Gulakov I. R., Zenevich A. O. (2012) *Photodetectors of Quantum Systems*. Minsk, Belarusian State Academy of Communications (in Russian).
11. Zenevich A. O., Kochergina O. V. (2025) Temperature Alarm. *Patent BY No 24755*. *Publ. 30.10.2025* (in Russian).

Received: 1 June 2026 Accepted: 30 June 2026

Вклад авторов

Зеневич А. О. сформулировал цель и задачи, методику проведения экспериментальных исследований, осуществил их научное руководство.

Кочергина О. А. и Терех И. Л. провели экспериментальные исследования и анализ полученных результатов.

Authors' contributions

Zenevich A. formulated the goal and objectives, the methodology for conducting experimental research, and provided their scientific guidance.

Kochergina O. and Terekh I. conducted the experimental studies and analyzed the results.

Сведения об авторах

Зеневич А. О., д-р техн. наук, проф., ректор Белорусской государственной академии связи (БГАС)

Кочергина О. В., канд. техн. наук, доц., зав. каф. радио и информационных технологий, БГАС

Терех И. Л., асп. каф. радио и информационных технологий, БГАС

Адрес для корреспонденции

220076, Республика Беларусь,
Минск, ул. Ф. Скорины, 8/2
Белорусская государственная академия связи
Тел.: +375 29 153-61-03
E-mail: I.Terech@bsac.by
Терех Ирина Леонидовна

Information about the authors

Zenevich A., Dr. Sci. (Tech.), Professor, Rector of the Belarusian State Academy of Communications (BSAC)

Kochergina O., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Head of the Department of Radio and Information Technologies, BSAC

Terekh I., Postgraduate of the Department of Radio and Information Technologies, BSAC

Address for correspondence

220076, Republic of Belarus,
Minsk, F. Skoriny St., 8/2
Belarusian State Academy of Communications
Tel.: +375 29 153-61-03
E-mail: I.Terech@bsac.by
Terekh Irina